坑内用空気洗浄器の基礎研究*

正 会 員 房 村 信 雄**

正 会 員 橋 本 文 作***

Study on the Air Washer in Underground

Nobuo FUSAMURA, and Bunsaku HASHIMOTO

The basic experiment was carried out to obtain some design data to be applied to the local air washer for eliminating airborne dust and harmful gases after blasting in underground. A pair of zigzag plate type eliminators was applied in this apparatus to eliminate sprayed waterdrop and dust.

From our records of the dust elimination test using a standard type impinger with iso-kinetic adapter and with water spray coverage 20~40 litres per 100m³ of air, and sizing by weight, the result shows to perform at from 85 to 90% eliminating efficiency with under 5 microns airborne quartz dust particles with concentration from 200 up to 370mg/m³ of air for air velocity range 2~4m/sec. For the gas elimination of recirculated air in the duct, the result shows that the air which is contaminated by high concentration of each CO and CO₂ is cleaned by washing with water spray 26 litres per 100m³ of air to negligible concentration in several minutes under constant air velocity 3m/sec.

Taking into consideration the experiment, the authors are confident that the obtained data is directly applicable to develop the underground air washing plant.

1. 緒 言

近年炭鉱、鉱山で急速坑道掘進、長距離坑道掘進の必要が増し掘進現場における発破後ガス、粉じんの急速排除問題が掘進作業促進上表面化している。また風管等の局部通気施設を用いて掘進現場では短時間に後ガスの排除ができたとしても、その坑道自体およびこれに隣接する坑道は長距離、長時間にわたってこれらのガス、粉じんに曝されることになる。この問題を解決するため発破現場で後ガス、粉じん除去のための局所処理装置（空気洗浄装置）を運転するならば大部分の後ガス、粉じんは発生現場で除去でき通気によって排除さるべきこれらの量はごく少量になるものと期待される。また洗浄に冷水を使用すれば空気冷却ができ、高温対策にも役立つものである。

さらに金属鉱山等の深い坑内や冷却を必要とする高温坑内では循環風量を全部坑外空気の入気に頼るには通気抵抗の高い坑道と相まって大きな通気動力費と冷却負荷を必要とするので、循環風量の大部分を車風とする通気方式にするのが得策となっている。このようなときは補助扇風機に付属してガス、粉じんの局所洗浄装置の設置が必要となる。

発破後ガス、粉じんの局所排除法としてわが国では散水や水の風管内噴霧などの手段が従来用いられてきたがその効果はあまり高くないようである¹⁾。また繊維などのろ過材を使用する乾式フィルタで処理して除じんする方法²⁾³⁾、あるいは風管内で水を噴霧し発破後、後ガスを吸引してろ過材で処理する方法⁴⁾が研究され、一部で実用化された。また南アフリカの金山では同様な乾式フィルタによって処理する方法が実用されている。しかしこれらの方法は圧力損失が極めて大きく、また補助的に坑道内に多量の水の噴霧を行なう場合でない限り除じん効率を90%以上に保つことは困難であり、乾式フィルタではガスの除去にはほとんど効果がない。

われわれは上記の目的に対して小型可搬式局所洗浄装置の開発のため実験室で浮遊粉じん、各種ガスの除去を対象として基礎研究を行なったので、その成果を報告する。

2. 粉じん、水滴分離のためのエリミネータ

空気洗浄器、冷却塔などの噴霧装置の空気出口側にはエリミネータと称するジグザグ型鉄板製の水滴分離装置が設けられている。われわれの研究した空気洗浄装置はまず水を噴霧し水滴と同時に微粒粉じんを除去するような構造のものである。まず大部分の水滴がエリミネータの表面に付着して除去されるとその濡れた水膜に粉じんが付着して空気から分離される。もしエリミネータ表面

* 昭和40年4月3日受理 一部昭和38年秋季大会(北九州市)で講演

** 工博 早稲田大学教授 資源工学科

*** 工博 早稲田大学助教授 資源工学科

に付着した粉じんが全部水に濡れて流れ去るものとする、粉じんの比重は水のそれより大きいので同じ粒径の水滴に比して粉じんの分離は容易であると考えられる。

エリミネータの分離効率については今まであまり研究がなされていないようである。ここでは井上によつて導かれた理論式⁹⁾を用いて水滴、粉じんの分離過程を説明したい。

2.1 分離の基本式

回転運動を行なう流体中における球形粒子の遠心力による移動速度は次式のように遠心力と遠心力場における流体の抵抗を等しくおいて求められる。この際空気中における粒子の流体抵抗は Reynolds 数が小さく Stokes の法則に従う。すなわち

$$\pi D^3(\rho - \rho_0)R\omega^2/6g = 3\pi\mu vD \quad \dots\dots\dots(1)$$

遠心力による粒子の移動速度 v は dR/dt であるからこれを上式に代入して粒子が R_1 から R まで移動するまでの過程を積分すると

$$\log \frac{R}{R_1} = \frac{D^2(\rho - \rho_0)\omega^2 t}{18\mu g} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここに D は粒子の直径(m); ρ, ρ_0 は粒子、空気の比重量 (kg/m^3) で $\rho \gg \rho_0$ であるから以後の計算では ρ_0 を ρ に対して省略する; R はエリミネータを通過する気流の曲率半径(m); ω は気流の角速度 (rad/sec) で μ は空気の粘性係数 ($\text{kg}\cdot\text{sec/m}^2$) である。

いまエリミネータの1断面を通る気流の状態を第1図のように仮定する。すなわち相隣のエリミネータの中心線を GHI とし、この中心線の中点 G, I より立てた垂線の交点 O を気流の曲率中心とし気流の外縁、内縁をそれぞれ ELF, KJM とする。最初 K 点にあつた微粒子が気流と共に流れ、遠心力のために最後に F 点に到達したと考えれば $2\theta = \omega t$ であるから(2)式は次のようになる。

$$\log \frac{R_2}{R_1} = \frac{D^2\rho\omega\theta}{9\mu g} \equiv K \quad \dots\dots\dots(3)$$

これがエリミネータによる分離を示す基本式である。すなわち K 点にあつた径 D なる粒子が F 点に達したとすれ

ば、 F 点においてエリミネータ表面に付着して気流から分離される訳である。(3)式から

$$D \geq \sqrt{\frac{9\mu g}{\rho\omega\theta} \log \frac{R_2}{R_1}} \equiv D_c \quad \dots\dots\dots(4)$$

なるような粒子は第1段の曲がりて全部が除去される。 $D < D_c$ なるような粒子は全部は除去されない。このような粒子の最初の断面 EGK における位置を P とし、 $OP = R$ とすれば同様に

$$\log \frac{R_2}{R} = \frac{D^2\rho\omega\theta}{9\mu g} \equiv K' \quad \dots\dots\dots(5)$$

点 P における径 D の粒子が F 点まで移動したとすると区間 EP にある径 D の粒子は断面 FIM に到る間に全部が除去されるが、区間 PK にある径 D の粒子は FIM を素通りする。径 D なる粒子が断面 EGK に均等に分布しているものとすれば径 D の粒子のうち FIM 断面までに捕捉される割合(分離効率) η は距離 EP の EK に対する長さの割合となり

$$\eta = \frac{EP}{EK} = \frac{R_2 - R}{R_2 - R_1} = \frac{1 - R/R_2}{1 - R_1/R_2} = \frac{1 - e^{-K'}}{1 - e^{-K}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

この式を用いて1つ折れエリミネータの分離効率を求めることができる。

2.2 エリミネータの幾何寸法の導入

第1図のようにエリミネータの1辺の長さを l とし、ジグザグ板の設置間隔を a とすると

$$R_1 = OH - HJ = \frac{l}{2} \operatorname{cosec} \theta - \frac{a}{2}$$

$$R_2 = OE = \left(\frac{l}{2} \operatorname{cosec} \theta + \frac{a}{2} \right) \cos \theta$$

$$\therefore \frac{R_2}{R_1} = \frac{\cot \theta + a \cos \theta / l}{\operatorname{cosec} \theta - a / l} \quad \dots\dots\dots(7)$$

また気流速度を V とすると $\omega = V/R$ で、 V_0 を単位面積当りの風速(m/sec)とすれば

$$V = V_0 \frac{a \cos \theta}{R_2 - R_1}, \quad R \approx \frac{R_1 + R_2}{2}$$

$$\begin{aligned} \therefore \omega &= \frac{V}{R} = \frac{2V_0 a \cos \theta}{R_2^2 - R_1^2} \\ &= \frac{8V_0 a \cos \theta}{2la(1 + \cos^2 \theta) \operatorname{cosec} \theta - l^2 - a^2 \sin^2 \theta} \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

(7), (8)式を(3)式に代入して整理すると

$$\begin{aligned} \frac{8D^2\rho V_0}{9\mu g} &= \frac{2la(1 + \cos^2 \theta) \operatorname{cosec} \theta - l^2 - a^2 \sin^2 \theta}{a\theta \cos \theta} \\ \log \frac{\cot \theta + a \cos \theta / l}{\operatorname{cosec} \theta - a / l} &\dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

上式の左辺は粒子径とその比重量および空気の温度、速度などの物理量で表わされ、右辺はすべてエリミネータの幾何寸法より成立っている。この式によつて与えられ

第1図 ジグザグ板エリミネータによる粒子分離の説明図

た寸法のエリミネータを用いる際の除去できる粒子の最小径を求めることができ、また逆に D を与えてエリミネータを設計できる。

3. 実験装置

粉じんおよびガスによる汚濁気流中に水を噴霧する空気洗浄装置として、通気実験用風洞の一部を改裝しダクトの一部に第2図のようなエァワッシャを挿入した。空気はダクト内を連続再循環し、風速はダンパーにより任意に調節することが可能である。また吐出口における気流方向を変えることによつてダクト内の空気は短時間に入れ換えることができる。噴霧は気流から分離した水を水槽に溜めそれを再使用する方式をとつた。ダクトの風上側にダストフィーダを取付け、またダクトにはエリミネータの圧力損失測定用小孔およびインピンジャに試料空気を吸引するための小孔を設けた。

(1) エリミネータ 第2章で説明したエリミネータの理論は気流の流線が幾分実際と異なることおよび気流の渦拡散による粒子の運動を考慮していないことなどの理由により実際の除去効率とかなりの偏りがあるものと思われる。特に理論式は風速が大きい程粒子の分離効率は良くなることを示しているが、風速の増大と共に渦拡散の影響が次第に大きく現われ分離効率は逆に低下することが予想される。したがつて特定寸法のエリミネータについて考えると分離効率が最大となる風速の存在が考えられる。(9)式を用いて種々検討した結果 a/l を約 $1/4$ にとり6種類の2つ折れエリミネータを作製し、予備実験を行なつた結果当然のことながら a の小さいものほど分離効率がよいので a の小さい2つを実験に供した。この2つのエリミネータの単一折れ曲がり部分に(9)式を適用して計算した結果は第3図に示すようである(2つ折れエリミネータ(第1図)には折れ曲がり部分が2個所存在する)。縦軸の D は設計条件の下において単一折れ曲がり部分で除去できる最小粒子径(理論値)を示し、この値以上の粒子は全部除去でき、この値以下の粒子は全部は除去されない。

a の大きい方のエリミネータを風上側に、小さい方を風下側に装備

(第2図参照)したとき、これらのエリミネータによる各風速に対する圧力降下は第4図のようである。

(2) 水の噴霧装置 水の噴霧は第2図に示すように向流1バンク方式として2個を直列に連結した方式をとり、水は反覆循環させた。ノズルは農業噴霧用のものおよびその噴出口を拡大して水量を大にし、微細水滴の発生を抑制するように改造したものを併用した。これらのポンプ圧(ゲージ圧)と水量の関係は第5図に示すようである。ポンプ圧は実験時に全ノズルを開放したときには 4.2 kg/cm^2 であつたが、ポンプとノズルの連結用パイプが細かつた関係でノズル入口における水压は約 3 kg/cm^2 であつた。ポンプは揚水量 15 l/min 、揚程 30 m 、回転数 $1,450 \text{ rpm}$ の1段片吸込ウエスコポンプを使用した。

(3) ダストフィーダ 発じん装置としてダクトの風上側に取付けた。これはガラス製ジョーゴの中心線にスパイラルの心棒を取付け、これを模型用小型モーター軸に減速装置を介して直結したもので実験時間中連続かつ均一に粉じんを供給できるようにしたものである。

4. 粉じんの除去試験

第2図 実験装置

第3図 使用したエリミネータによつて除去できる最小粒子径

第4図 使用したエリミネータの圧力損失

労働衛生上の見地から粉じん抑制の主な目的は珪肺防止にあるので実験には粉じん試料として石英(比重2.37)を-150meshに粉碎したものを使用した。空気洗浄器の除じん効率 η は次式によつて算出した。

$$\eta = \frac{c_1 - c_2}{c_1} = 1 - \frac{c_2}{c_1} \dots \dots \dots (10)$$

ここに c_1, c_2 は汚染空気の洗浄器通過前後における粉じん濃度である。この実験では標準型インピンジャ集じん計で試料空気採取して、重量法によつて効率を計算した。重量法を用いる際注意すべきことはいわゆる径 5μ 以下の危険粉じんが問題となるので、形式的に全体の効率を求めてもあまり意味がない。したがつてこの実験では(10)式によつて $+5\mu$ の粉じんと -5μ の粉じんについてのおおの除じん効率を求めた。 c_1, c_2 を求めるには洗浄器の風上、風下側で2台のインピンジャによる同時採取が必要であるが、便宜上この実験では試料空気の採取は洗浄器出口についてのみ行ない、風上側の粉じん濃度は風下側の濃度と水槽内の濃度から推定した。すなわち洗浄器に入る粉じんは水滴と一緒にエリミネータによつて捕捉されて水槽内に溜る量と捕捉されないで風下側に吹抜ける量との和であるから、単位風量についてこの両者の和は洗浄器に入る粉じん量となるはずである。なおダストフィーダと洗浄器の間には約3mの距離があり、供給された一部の粉じんはこの間のダクト底面や側壁に付着するので供じん量は洗浄器入口における浮遊粉じん量と一致しない。気流中に開口するインピンジャ吸引口には、風速によつて吸引空気中の粒度分布が気流中の粒度分布と異なってくるのを防止する意味で各風速

第5図 ノズルの圧力—水量特性

に応じた isokinetic adapter を取付けて試料空気採取した。各採取試料の一部はアンドレアゼンピペットにより粒度分析を行ない、他は単に $+5\mu$ 、 -5μ の粒子に分離した。噴霧水は水道水を使用したので水槽内の粉じん濃度算出に際してはあらかじめ水道水についての不揮発残渣を測定しておきこれを補正した。実験全体を通じて粉じん負荷は $200 \sim 370 \text{ mg/m}^3$ であつた。

前段、後段の噴霧水量を4.9, 2.7 l/min(一定)としたとき各風速に対する粉じんの除去効率は第6図に示すようであつた。この装置によつては $2 \sim 4 \text{ m/sec}$ の風速のとき効率がよいことが明らかである。さらに風速を一定とし(3.2 m/sec), 前段の水量を種々に変えた場合の除じん効率は第7図に示すようである。図から明らかなように除じん効率は噴霧水量の大小にはあまり影響されない。これは噴霧した水滴が気流と接触している時間が短かく噴霧水滴に接触して行なわれる除じんは少なく、大部分の除じんは水滴が気流より分離されてエリミネータ表面に水膜を作り、これに粉じん粒子が付着して行なわれるものと解釈される。したがつてこと除じんに関してはエ

第6図 噴霧水量を一定としたときの風速に対する除じん効率

第7図 風速を一定としたときの前段噴霧水量に対する除じん効率

リミネータに給水して常にその表面を濡らしておけば大かたの目的は達成され、圧力水の噴霧はあまり必要ないものと考えられる。

なお噴霧水は水槽内の水を連続使用したため最初のうちは綺麗な水が噴霧されるが、水槽内の水が汚れてくるに従って噴霧水には微細な粉じん粒子が含まれ、このうち微小水滴の一部はエリミネータを通り抜けインピンジャに吸引されたことになる。したがって -5μ の除じん効率は新鮮な水を噴霧したときに比べて低くでていることは明らかであり、坑内での小型洗浄器では噴霧水は再使用しないから、除じん効率はこの実験値よりも高くなることが期待される。

水槽内に捕集された粉じんの粒度分布は第8図のロジノンラムラ線図に示すように直線Aはフィーダで飛散させたもとの粉じんの粒度分布である。供給された粉じんのうち径の大きい粒子は洗浄器に入るときはかなり減少していることがわかる。各風速とも細かい粒子ほどとれにくいことを示し、また風速を増しても取りうる粒子にはある限界があることがわかる。

5. ガスの除去試験

普通の発破後ガスとして存在するものうち人体に有害なものは CO 、 CO_2 および窒素の酸化物であるので、これらのガスを含む空気を洗浄装置を含むダクト内を循環させその濃度の時間的変化を試験した。ダクト内の風速は、前述したように除じん効率の一番よい風速は $2\sim 4\text{ m/sec}$ であつたので、 3 m/sec に固定し、また噴霧水量は 7.6 l/min として実験を行なつた（水空気比は 0.22 ）。試料空気はいずれも真空状態にした内容積約 250 cc の試料ビンを用いて採取し、これを北川式検知管によつて測定した。初めに洗浄器の風上、風下において同時に空気採取して測定した結果その濃度に有意の差が現われなかつたので、最初ガス濃度を一定とした空気をダクト内を循環させ噴霧を開始してから濃度の時間的変化について測定を行なつたものである。これらの測定結果は第9図に示すようである。

(1) CO 、 CO_2 の洗浄試験 都市ガスをダクト内に一定時間放流し、しかるのち噴霧を開始してその濃度の時間的変化を測定した。 CO_2 は初めの濃度が低いこともあつて短時間で平衡状態になつたが、 CO は図示のように急速に減少した。

(2) NO_2 の洗浄試験 ダクト内で銅屑を入れた容器に硝酸を注いで NO を発生させ、一定時間放置したのち取出して実験を始めた。発生した NO は直ちに空気中の酸素と化合して NO_2 に変ずる。最初のうちは CO と同じように急速に減少するが、時間の経過と共に CO に比べて減少割合が小さくなる。また NO_2 は酸性なのでアルカリ溶液にはよく溶解するとの予想のもとに水槽の水を 0.3% NaOH 溶液としたときの実験も行なつたが（曲線D）、 NO_2 濃度の減少の傾向は水道水を用いたときとほとんど同じで、アルカリ溶液を用いたことによる顕著な効果は現われていない。

δ は粒径、 R は残率で R と δ の関係は次式によつて表わされる

$$R = 10^{-b'\delta^n} \times 100(\%)$$

第8図 除去粉じんの粒度分布

第9図 ガスの洗浄試験

また NO_2 は新鮮な固体の表面、特に活性炭によく物理、化学的付着をするといわれている⁷⁾。そこでこれら付着に関する実験を行なった。最初内容積が等しい3個の試料容器に NO_2 ガスを採取し、乾いたダクト内（水を噴霧しない）を 3m/sec で空気を循環させ空気がダクト内を一巡する時間（約5sec）の間に1つの試料容器中のガスを一定割合で放出し、1分経過後ダクト内の空気を洗浄試験と同じ要領で採取した（実験1）。次にダクト内の空気を速やかに入れ換えて2個目の試料容器中のガスを前と同じ要領で放出し、1分経過後試料空気採取した（実験2）。さらに前と全く同様にしてダクト内の空気を入れ換え、3個目の試料容器中のガスを放出した。この際除じん試験に用いた珪石の粉じんを乾燥し、これをガス放出と併行して飛散させた。この実験においても1分経過後に試料空気採取した（実験3）。これら3種の試料空気の窒素酸化物の測定値（各4個の測定値の平均）は第1表に示すようである。各実験値の間には明らかな差が認められる。すなわち実験1では NO_2 ガスの一部はダクトの内壁およびそれに付着している粉じんに物理、化学的付着をなし、ある限られた時間内は平衡状態になっているものと考えられ、実験2に比べてガス濃度は低い。また実験3では同時に飛散させた粉じんの表面に同じような付着をなしたと考えられ、実験2に比べて濃度は低い。実験1と比べると濃度は高いが、これは飛散粉じん量に関連する相対的事柄で、粉じん量が多くなれば低くなることもありうると考えられる。これらの結果を発破現場に適用して考えると、岩石の爆破によって生ずる岩盤の新しい面および飛散する粉じんに発生した NO_2 ガスの相当量が物理、化学的付着をなすものと思われる。

 第1表 NO_2 の付着試験

実験	NO_2 濃度 ppm
1	15 ± 2.4
2	38 ± 3.2
3	30 ± 3.1

6. 結 言

一般の空気洗浄器における水空気比 L/G (L は噴霧水量 kg/min, G は風量 kg/min) は 0.4~1.2 程度⁸⁾ で風量に比較してかなりの水量を使用しているが、この実験での除じん効率のよい風速 3m/sec における L/G は 0.22 である。筆者らが実地ならびに文献によつて調べたアメリカにおける坑内空気洗浄器の L/G は 0.5 以下であり、比較的大風量を扱う坑内用としてはどこでもあまり多くの

水は使用していないようである。また空気冷却を目的とする洗浄器にあつては L/G は冷却負荷、最終冷却空気温度と噴霧水温によつて決定されるわけであるが、坑内でのスプレークーラーの L/G は 0.5~1.0 のものが多いようである。

坑内循環空気中の粉じん、ガスの洗浄を目的として開発され、中型補助扇風機に直結された洗浄器を有する Climax 鉱山の "Microdyne fan" (1,700m³/min, 175 mmAq, 100HP—Joy Manufacturing Co. 製) の噴霧圧力は 1.4 kg/cm² (ゲージ)、水は5個のノズルから噴霧され、その L/G は 0.075 であり、洗浄器内の平均風速は 2.5m/sec で 3~4 μ の粉じん粒子に対して計数法で 95% の除じん効率があり、0.7 μ 以上の粉じんに対して有効であるとのことである。またこの洗浄器を通過することによつてフュームはほとんど除去され、発破時期における吸込、吹出空気の煙霧は明らかな対照をなしていた。

筆者らの行なつた実験でもこれらと大体同じような結果が得られ、Microdyne fan の構造の詳細が不明のため* 正確な比較をすべくもないが、実験結果に大きな誤りがなかつたものと確信している。したがつてこの実験結果は坑内用空気洗浄器の開発に際しての基礎データとなりうるものと考えられる。

この実験に使用した費用は文部省科学試験研究交付金によつてゐる。また実験装置の製作と実験に協力された中谷孝、朝枝英太郎の両君にお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 田尻昭英、原敬一：浮遊粉じんの抑制に関する研究、採鉱と保安 7 巻 4 号 1~10 頁、7 号 10~18 頁、昭和 36 年
- 2) Verwendung eines Schiessdamms mit blasender Bewetterung und Trockenfilterung der Schießschwaden auf den Bismarckschächten, Bergbau-Rundschau, Oct., 1956
- 3) M. Landwehr: Neue Wege zur Staubbekämpfung im Bergbau, Schägel und Eisen, 2 (1960) 77
- 4) M. Landwehr: Die Staubentwicklung bei der Sprengarbeit und Möglichkeiten zur Staubbekämpfung, Nobel Hefte 3 (1961) 89
- 5) D. F. H. Grave: Trends in the Ventilation of South African Gold Mines, Jour. of M. V. S. of S. Africa, Vol. 14 No. 12 Dec. 1961, p. 242~243
- 6) 井上宇市：ジグザグ板による水滴の分離効率、日本建築学会論文報告集、60 号、昭和 33 年 10 月
- 7) H. G. Borén: Carbon as a Carrier Mechanism for Irritant Gases, Archives of Environmental Health, Vol. 8 No. 1 Jan., 1964, p. 119~124
- 8) 例えば 井上宇市：空気調和ハンドブック

* 構造の詳細に関する図面の提供をその自由を得ていないとの理由で鉱山当局によつて拒否された。